

Моделирование и расчет параметров процесса взаимодействия электромагнитной волны с единичной металлизированной частицей конденсированной фазы

© А.К. Шостов, К.В. Федотова, В.В. Козичев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрено взаимодействие падающей монохроматической электромагнитной волны с единичной частицей конденсированной фазы в замкнутом объеме без учета влияния результата взаимодействия с другими частицами. Разработана математическая модель и получены зависимости амплитудных значений приведенной индикатрисы рассеяния в зависимости от диаметров частиц в интервале 100...500 мкм, частот генерируемого излучения 9...15 ГГц и диэлектрических проницаемостей частиц конденсированной фазы в интервале 1,6–12. Представлен анализ результатов численного исследования, который демонстрирует, что увеличение диаметра частиц ведет к резкому росту интенсивности рассеянной волны. Показано, что увеличение электромагнитной частоты является приоритетным способом усиления интенсивности рассеянной волны, позволяющим детектировать частицы меньших диаметров.

Ключевые слова: конденсированная фаза, электромагнитная волна, рассеяние Ми, рассеяние Рэлея, интенсивность рассеянной волны

Введение. В настоящее время интенсивно развиваются и находят все более широкое применение импульсные ракетные двигатели на энергетических конденсированных системах (ЭКС), предназначенные для создания значительной тяги в течение короткого промежутка времени. Импульсные двигатели устанавливаются в маршевые двигательные установки (ДУ), а также в ДУ систем коррекции высокоточных летательных аппаратов (ЛА) в качестве вспомогательных для ракет космического и иного назначения.

Для эффективного проектирования, производства и эксплуатации подобных двигателей необходимо получать исчерпывающую информацию по характеристикам горения широкой номенклатуры существующих металлизированных ЭКС, а также иметь средства экспериментального определения характеристик и особенностей горения новых рецептур в широких диапазонах значений давления и скорости его изменения.

Скорость горения ЭКС — основной параметр, используемый при проектировании и внутрибаллистическом расчете ДУ различного назначения. Кроме того, в процессе запуска и работы ДУ на основном режиме возникают нестационарные процессы — повышение и снижение давления с различной скоростью. Исследования нестационарного режима горения ЭКС могут дать полезную информацию

о механизме горения и служить базисом для проверки существующих моделей горения. Анализ процессов нестационарного горения ЭКС и результаты экспериментов рассмотрены в [1–3].

Метод сверхвысокочастотного излучения (СВЧ), позволяющий с высокой точностью определять скорость горения ЭКС без металлических добавок [4–7], можно считать одним из перспективных методов экспериментального исследования механизма горения ЭКС. Однако при наличии таких добавок в продуктах сгорания возникают сложности, вызванные взаимодействием падающей электромагнитной волны со взвесью частиц конденсированной фазы. Это приводит к появлению дополнительных источников электрического поля и, в свою очередь, может создать помехи для системы измерения, вызванные вторичной (отраженной) волной от взвеси частиц, и приводит к увеличению погрешности данного метода диагностики [8, 9].

Электромагнитные волны способны распространяться в диэлектрических средах, рассеиваясь и/или поглощаясь, а также отражаться от поверхностей резкой смены диэлектрических параметров, в том числе и от металлических. Это свойство позволяет определять параметры горения ЭКС как в стационарных, так и в нестационарных условиях. Подобный вопрос также рассматривается применительно к исследованию скорости газификации твердых топлив в [10–12].

В настоящее время в энергосиловых установках применяют металлизированные ЭКС, содержащие порошкообразные добавки металлов и их соединений с неметаллами. В продуктах сгорания таких веществ содержатся частицы конденсированной фазы, размеры которых не превышают 0,1 мм. В этом случае взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с диэлектрическими частицами соответствует рассеянию Рэлея (частный случай рассеяния Ми для частиц, имеющих размер много меньше длины волны излучения) и происходит без изменения фазы. Также стоит отметить, что не проводилось работ, посвященных СВЧ-диагностике при исследовании горения металлизированных ЭКС.

Цель работы — математическое моделирование процесса рассеяния волны при взаимодействии электромагнитного излучения с единичной металлической частицей для разных диапазонов значений диаметров частицы, частоты падающей волны и диэлектрической проницаемости частицы.

Объект моделирования. При проведении экспериментального определения скорости горения конденсированных материалов продукты сгорания находятся в некотором замкнутом объеме. При этом давление в этой области может быть как постоянным, так и переменным — в случае повышения давления вследствие увеличения массы поступающих продуктов либо работа на режиме резкой принудительной декомпрессии.

Процесс взаимодействия падающей электромагнитной волны с совокупностью частиц конденсированной фазы, образующих дисперсную систему [13], сложно аналитически описать. Исследование процессов поглощения и рассеяния для единичной частицы представлено в [14–16].

Однако необходимо заметить, что вид рассеяния меняется в зависимости от диаметра частицы и длины электромагнитной волны. При рассеянии Ми линейные размеры частицы соизмеримы с длиной волны, а в случае рассеяния Рэлея размеры частицы значительно меньше последней. В работе [17] рассматриваются результаты теоретических исследований и экспериментов, в которых диаметры в зависимости от материала частиц варьируются от 100 до 500 мкм, например для частиц Al_2O_3 . Границы применимости теорий Ми и Рэлея характеризуются коэффициентом α , который рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}, \quad (1)$$

где d — диаметр частицы; λ — длина падающей электромагнитной волны.

Для условий эксперимента по исследованию металлизированных ЭКС, содержащих частицы Al_2O_3 диаметром 500 мкм [17], можно вычислить данный коэффициент:

$$\alpha = \frac{3,14 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{33,2 \cdot 10^{-3}} = 0,047. \quad (2)$$

В результате расчета получено значение $\alpha < 0,2$, что соответствует теории Рэлея.

Сами же частицы конденсированной фазы в данном объеме находятся друг от друга на расстоянии, превышающем их диаметры. Применительно к рассматриваемой задаче такой подход оправдан тем, что взаимодействие волны с одной частицей не влияет на аналогичное взаимодействие с другой, поскольку расстояние между ними достаточно велико по сравнению с их диаметрами. Расчетная область приведена на рис. 1.

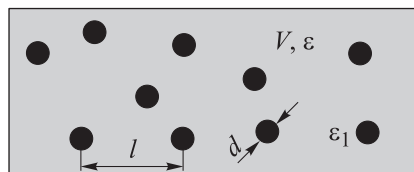


Рис. 1. Расчетная область:

l — расстояние между частицами; d — диаметр частиц; V — объем замкнутой области; ε — диэлектрическая проницаемость среды вокруг частиц; ε_1 — диэлектрическая проницаемость частиц

Практически СВЧ-метод диагностики можно реализовать на экспериментальной установке, схема и 3D-модель камеры сгорания и затворного узла которой показаны на рис. 2. Основными конструктивными элементами являются камера сгорания, в которой реализуется горение исследуемого образца ЭКС, и затворный узел, обеспечивающий ввод и прохождение СВЧ-волны через образец металлосодержащей ЭКС, продукты сгорания которого с частицами конденсированной фазы определенным образом взаимодействуют с этой фазой. Наряду с указанным выше в состав установки входят комплекс систем обеспечения (электропитание всех систем стенда, источник сжатого воздуха и т. п.), комплекс измерительно-регистрирующей аппаратуры, обеспечивающей обработку первичных сигналов датчиков и запись массива данных на компьютер, а также систему измерения давления горения образцов ЭКС в камере сгорания.

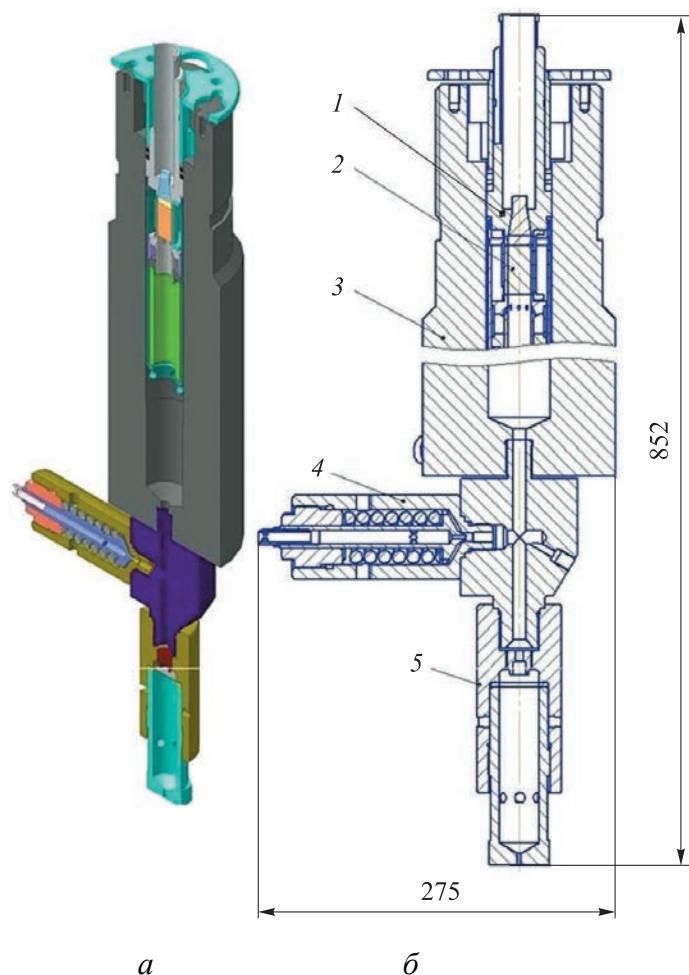


Рис. 2. 3D-модель (а) и схема (б) экспериментальной установки:
1 — затворный узел; 2 — образец ЭКС; 3 — камера сгорания; 4 — предохранительный клапан и пироклапан принудительного сброса давления; 5 — мембранный узел

Математическая модель. При прохождении электромагнитной волны через замкнутый объем, заполненный газом и взвесью частиц конденсированной фазы, возникают эффекты отражения и рассеяния, причем последний может также сопровождаться частичным, а иногда и полным поглощением частицей волны. Обычно рассеяние падающей волны происходит на различных оптических неоднородностях, причем рассеянная волна может иметь другую частоту и интенсивность. Но рассматривается случай упругого рассеивания, т. е. такого, при котором вторичная волна имеет такую же частоту, что и падающая.

В процессе взаимодействия падающей волны с единичной частицей последняя становится источником электромагнитного излучения. Напряженность электрического поля внутри частицы определяется выражением

$$\vec{E} = \frac{3\varepsilon}{3\varepsilon_1 + 2\varepsilon} \vec{E}_0, \quad (3)$$

где \vec{E}_0 — вектор напряженности электрического поля падающей волны.

Как правило, диэлектрическая проницаемость металлических частиц больше, чем окружающего их газа, поэтому, в соответствии с (3), напряженность электрического поля вторичной волны будет меньше, чем у падающей.

При исследовании рассеяния света используют понятие индикатрисы рассеяния [18], представляющей собой геометрическое место точек, которые характеризуют величину интенсивности рассеянной волны в определенном направлении. Она зависит от угла наблюдения θ и обозначается как I_θ . Можно записать уравнение для определения интенсивности рассеянной волны в зависимости от угла наблюдения θ :

$$I_1(\theta) = I_0 \left(\frac{3\varepsilon}{4\pi c^2 r} \right)^2 \omega^4 V_1^2 \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon} \right)^2 \sin^2(\theta), \quad (4)$$

где I_0 — интенсивность падающей волны; $\omega = 2\pi\nu$ — круговая частота падающей волны; $V_1 = 4/3 \pi r^3$ — объем частицы; c — скорость света.

Как следует из уравнения (4), интенсивность рассеянной волны зависит от таких факторов, как размер частицы, диэлектрическая проницаемость среды и частицы. Для оценки их влияния на величину индикатрисы необходимо построить графические зависимости, причем интенсивность их воздействия будет определяться при значении

угла $\theta = \pi/2$, которому соответствует максимальное значение интенсивности. Удобнее проводить исследование для приведенной индикатрисы

$$I = \frac{I_1(\pi/2)}{I_0}. \quad (5)$$

В ходе математического моделирования составлена расчетная программа на алгоритмическом языке Python. При моделировании задают диаметр частицы (100...500 мкм для частиц Al_2O_3), диэлектрические проницаемости (1,6...12,0 Ф/м для Al_2O_3 и В соответственно), а также частоты электромагнитной волны 9...15 ГГц, излучаемой СВЧ-генератором.

Анализ результатов расчетного исследования. Результаты расчета в виде графических зависимостей приведенной индикатрисы рассеяния от диаметра частицы, частоты падающей волны и диэлектрической проницаемости частицы представлены на рис. 3–5 соответственно.

Как видно на графиках, приведенных на рисунках, интенсивность рассеянной волны существенно зависит от размеров частицы, что соответствует закону Рэлея (интенсивность пропорциональна 6-й степени диаметра), а значит, крупнодисперсные частицы гораздо сильнее рассеивают электромагнитные волны. Это может привести к невозможности детектировать рассеянные волны от частиц малых размеров, в связи с чем ухудшается применение СВЧ-метода диагностики.

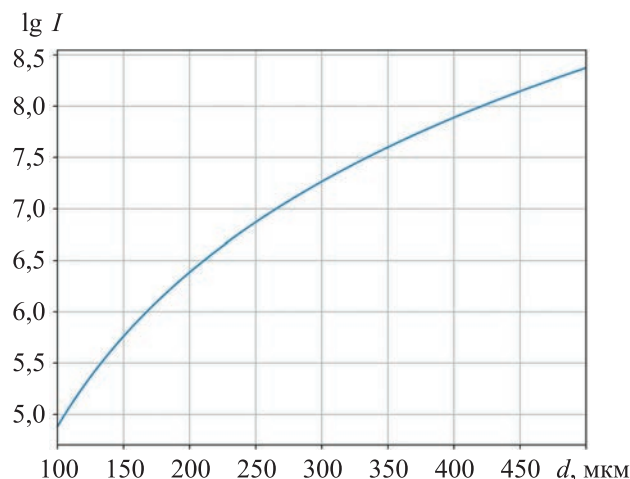


Рис. 3. Приведенная индикатриса рассеяния при изменении диаметра частицы

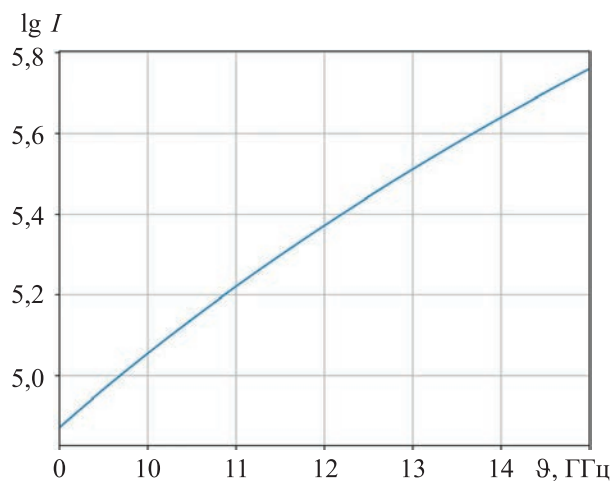


Рис. 4. Приведенная индикатриса рассеяния при изменении частоты падающей электромагнитной волны

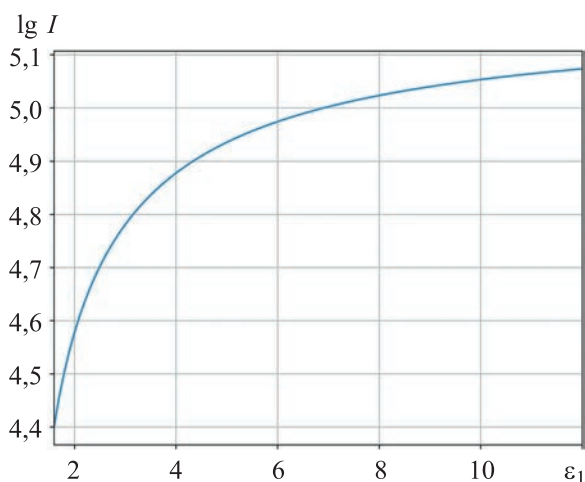


Рис. 5. Приведенная индикатриса рассеяния при изменении диэлектрической проницаемости частицы

Кроме того, частота падающей волны влияет на амплитудное значение интенсивности. При проведении эксперимента можно регулировать параметры СВЧ генератора, что позволяет повышать частоту волны и добиться более интенсивного рассеяния, повышающего эффективность СВЧ-метода диагностики.

Поскольку диэлектрическая проницаемость частицы зависит только от ее свойств, можно принять для разных металлических наполнителей определенные значения ϵ_1 , что позволяет учитывать этот показатель в полученных результатах.

Заключение. Разработана модель рассеивания электромагнитной волны единичной металлизированной частицей применительно

к СВЧ-диагностике металлизированных ЭКС. Выполнено математическое моделирование процесса рассеивания электромагнитной волны единичной металлизированной частицей. Результаты показывают, что при увеличении диаметра частицы в 5 раз амплитудное значение интенсивности вторичной волны увеличивается на три порядка. Поэтому можно сделать вывод, что способность к рассеиванию электромагнитных волн взвесью из частиц конденсированной фазы будет определяться частицами с наибольшими диаметрами. Увеличением частоты падающей электромагнитной волны на несколько гигагерц можно добиться усиления в 10 раз интенсивности отраженной волны, что позволит детектировать частицы с меньшими диаметрами. При увеличении диэлектрической проницаемости частиц от 1,6 до 10 Ф/м интенсивность вторичной волны увеличивается в 8 раз. Следовательно, содержание примесей частиц с большим значением диэлектрической проницаемости может привести к сильным погрешностям СВЧ-диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гусаченко Л.К., Зарко В.Е. Анализ нестационарных моделей горения твердых топлив (обзор). *Физика горения и взрыва*, 2008, № 1, с. 35–48.
- [2] Лавров Б.П., Шарай Ю.М., Сергеев А.В., Гавриленко И.В. Определение скорости горения твердого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, Приборостроение*, 2009, № 1, с. 28–36.
- [3] Ягодников Д.А., Сухов А.В., Сергеев А.В., Козичев В.В. Экспериментальная методика и модельная установка для исследования горения энергетических конденсированных систем при высоких давлениях. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. Спец. выпуск «Энергетическое и транспортное машиностроение»*, 2011, с. 63–73.
- [4] Перов В.В., Зарко В.Е., Жуков А.С. Новый микроволновый метод измерения нестационарной массовой скорости газификации конденсированных систем. *Физика горения и взрыва*, 2014, т. 50, № 6, с. 130–133.
- [5] Zarko V., Perov V., Kiskin A., Nalivaichenko D. Microwave resonator method for measuring transient mass gasification rate of condensed systems. *Acta Astronautica J.*, 2019, vol. 158, pp. 272–276.
- [6] Подшивалов А.И., Гришин Ю.А., Кискин А.Б., Зарко В.Е. Усовершенствованный СВЧ-метод измерения динамических параметров процесса газификации конденсированных веществ. *Физика горения и взрыва*, 2022, т. 58, № 5, с. 87–95.
- [7] Ягодников Д.А., Сергеев А.В., Козичев В.В. Экспериментально-теоретическое обоснование повышения точности измерения скорости горения энергетических конденсированных систем СВЧ-методом. *Физика горения и взрыва*, 2014, № 2, с. 51–61.
- [8] Баландин О.А., Верхотуров А.Р. Теоретические аспекты взаимодействия твердых частиц с электромагнитными волнами. *Вестник ЧумГУ*, 2011, № 12 (79), с. 71–77.
- [9] Баландин О.А., Верхотуров А.Р. Влияние интенсивности электромагнитных волн на движение твердой частицы. *Вестник ЗабГУ*, 2013, № 11 (102), с. 17–21.

- [10] Murphy J.J., Krier H. Evaluation of ultrasound technique for solid-propellant burning rate response measurements. *Propul. Power. J.*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 641–651. DOI: 10.2514/2.5978
- [11] Strand L.D., Magiawala K.R., McNamara R.P. Microwave measurement of the solid-propellant pressure-coupled response function. *Spacecraft rockets J.*, 1980, vol. 17, no. 6, pp. 483–488. DOI: 10.2514/3.57768
- [12] Eisenreich N., Kugler H.P., Sinn F. An optical system for measuring the burning rate of solid propellant strands. *Propell. Explos. Pyrotech.*, 1987, vol. 12, pp. 78–80.
- [13] Дамарацкий И.А., Трунов П.А. Моделирование на основе волновой оптики процессов поглощения и рассеяния электромагнитных волн СВЧ диапазона в дисперсных системах. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.*, 2013, № 9, с. 445–454.
- [14] Гузатов Д.В., Гайда Л.С., Афанасьев А.А. Теоретическое исследование силы светового давления, действующей на сферическую диэлектрическую частицу произвольного размера в интерференционном поле двух плоских монохроматических электромагнитных волн. *Квантовая электроника*, 2008, т. 38, № 12, с. 1155–1162.
- [15] Баландин О.А., Верхотуров А.Р. Влияние параметров электромагнитных волн на движение твердой минеральной частицы. *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. XV Международная научно-практическая конференция*, 2015, ч. 3, с. 88–93.
- [16] Баландин О.А., Верхотуров А.Р. Динамическая модель взаимодействия плоскополяризованных электромагнитных волн с частицей диэлектрика. *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. XVIII Международная научно-практическая конференция*, 2018, ч. 2, с. 158–160.
- [17] Ягодников Д.А. *Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах*. 2-е изд., испр. и доп. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [18] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*, Москва, Физматлит, 1992.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шостов А.К., Федотова К.В., Козичев В.В. Моделирование и расчет параметров процесса взаимодействия электромагнитной волны с единичной металлизированной частицей конденсированной фазы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2275>

Шостов Артём Константинович — инженер НУК ЭМ 1.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: catcher.boxer@gmail.com

Федотова Ксения Викторовна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: рабочие процессы в камерах сгорания ракетных и реактивных двигателей, численное моделирование и экспериментальные исследования особенностей течения, теплообмена и горения в камерах сгорания ракетных и реактивных двигателей. e-mail: fedotova@bmstu.ru

Козичев Владимир Владимирович — старший преподаватель кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ko_vv@bmstu.ru

Computational analysis of the absorption and scattering of electromagnetic waves by a single particle of the condensed phase of combustion products of energetic condensed material

© A.K. Shostov, K.V. Fedotova, V.V. Kozichev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

At present, an important task is to determine the burning rate of energy condensed systems (ECS) with metal additives under non-stationary conditions. At the same time, a promising way to experimentally determine the law of the burning rate is the radio wave microwave method. However, the presence of a significant amount of condensed phase in the combustion products of metallized ECS complicates the tuning of the interference microwave diagnostic method. The article considers the interaction of an incident monochromatic electromagnetic wave with a single particle of the condensed phase in a closed volume without taking into account the influence of the result of the interaction of other particles with the incident wave. A mathematical model has been developed and scattering indicatrices have been obtained for various particle diameters in the range from 10 to 20 micrometers, generated radiation frequencies in the range of 9–15 GHz, and permittivities of condensed-phase particles in the range of 1.6–10. An analysis of the results of a numerical study demonstrates that an increase in the particle size leads to a sharp increase in the intensity of the scattered wave. Changing the frequency of the wave generated by the microwave generator is a priority method for amplifying the intensity of the scattered wave, which makes it possible to detect particles with smaller diameters up to several micrometers.

Keywords: condensed phase, electromagnetic wave, Mi scattering, Rayleigh scattering, gasification rate

REFERENCES

- [1] Gusachenko L.K., Zarko V.E. Analiz nestacionarnykh modelej gorenija tverdykh topliv (obzor) [Analysis of unsteady solid-propellant combustion models (review)]. *Fizika gorenija i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, no. 1, pp. 35–48.
- [2] Lavrov B.P., Sharay YU.M., Sergeev A.V., Gavrilenko I.V. Opredelenie skorosti gorenija tverdogo topliva s primeneniem izmeritelya polnyh soprotivlenij SVCH-diapazona [Determination of the burning rate of solid fuel using a microwave impedance meter]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, Seriya Priborostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2009, no. 1, pp. 28–36.
- [3] Yagodnikov D.A., Suhov A.V., Sergeev A.V., Kozichev V.V. Eksperimental'naya metodika i model'naya ustanovka dlya issledovaniya gorenija energeticheskikh kondensirovannykh sistem pri vysokih davleniyah [Experimental technique and model setup for studying the combustion of energy condensed systems at high pressures]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie. Spec. vypusk «Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie» — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering. Spec. Edition “Energy and transport mechanical engineering”*, 2011, pp. 63–73.

- [4] Perov V.V., Zarko V.E., Zhukov A.S. Novyi mikrovolnovyi metod izmereniya nestatsionarnoy massovoi skorosti gazifikatsii kondensirovannykh sistem [New microwave method for measuring unsteady mass gasification rate of condensed systems]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 130–133.
- [5] Zarko V., Perov V., Kiskin A., Nalivaichenko D. Microwave resonator method for measuring transient mass gasification rate of condensed systems. *Acta Astronautica J.*, 2019, vol. 158, pp. 272–276.
- [6] Podshivalov A.I., Grishin Yu.A., Kiskin A.B., Zarko V.E. Uovershenstvovannyi SVCH-metod izmereniya dinamicheskikh parametrov protsessa gazifikatsii kondensirovannykh veschestv [Improved microwave method for measuring the dynamic parameters of gasification of condensed substances]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 58, no. 5, pp. 87–95.
- [7] Yagodnikov D.A., Sergeev A.V., Kozichev V.V. Eksperimental'no-teoreticheskoe obosnovanie povysheniya tochnosti izmereniya skorosti goreniya energeticheskikh kondensirovannykh sistem SVCH-metodom [Experimental and theoretical basis for improving the accuracy of measuring the burning rate of energetic condensed systems by a microwave method]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, no. 2, pp. 51–61.
- [8] Balandin O.A., Verkhoturov A.R. Teoreticheskie aspekty vzaimodeystviya tverdykh chastits s elektromagnitnymi volnami [Theoretical aspects solid particles and electromagnetic waves interaction]. *Vestnik CHitGU — Herald of the Chita State University*, 2011, no. 12 (79), pp. 71–77.
- [9] Balandin O.A., Verkhoturov A.R. Vliyanie intensivnosti elektromagnitnykh voln na dvizhenie tverdogo chastitsy [The intensity influence of electromagnetic waves on the solid particles motion]. *Vestnik ZabGU — Herald of Zabaikalye State University*, 2013, no. 11 (102), pp. 17–21.
- [10] Murphy J.J., Krier H. Evaluation of ultrasound technique for solid-propellant burning rate response measurements. *Propul. Power. J.*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 641–651. DOI: 10.2514/2.5978
- [11] Strand L.D., Magiwala K.R., McNamara R.P. Microwave measurement of the solid-propellant pressure-coupled response function. *Spacecraft rockets J.*, 1980, vol. 17, no. 6, pp. 483–488, DOI: 10.2514/3.57768
- [12] Eisenreich N., Kugler H.P., Sinn F. An optical system for measuring the burning rate of solid propellant stranda. *Propell. Explos. Pyrotech.*, 1987, vol. 12, pp. 78–80.
- [13] Damarackiy I.A., Trunov P.A. Modelirovanie na osnove volnovoy optiki protsessov pogloscheniya i rasseyaniye elektromagnitnykh voln SVCH diapazona v dispersnykh sistemakh [Modeling on the basis of wave optics of the processes of absorption and scattering of electromagnetic waves in the microwave range in dispersed systems]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn. — Science and education, BMSTU, Electr. J.*, 2013, no. 9, pp. 445–454.
- [14] Guzatov D.V., Gaida L.S., Afanasiev A.A. Teoreticheskoe issledovanie sily svetovogo davleniya, deistvuyushchey na sfericheskuyu dielektricheskuyu chastitsu proizvol'nogo razmera v interferentsionnom pole dvukh ploskikh monokhromaticheskikh elektromagnitnykh voln [Theoretical study of the light pressure force acting on a spherical dielectric particle of an arbitrary size in the interference field of two plane monochromatic electromagnetic waves]. *Kvantovaya elektronika — Quantum Electronics*, 2008, vol. 38, no. 12, pp. 1155–1162.
- [15] Balandin O.A., Verkhoturov A.R. Vliyanie parametrov elektromagnitnykh voln na dvizhenie tverdoi mineral'noi chasticy [Influence of parameters of electromagnetic waves on the movement of a solid mineral particles]. *Kulaginskie*

- chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh processov. XV mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya — Kulagin readings: technique and technology of production processes. XV international scientific and practical conference, 2015, vol. 3, pp. 88–93.*
- [16] Balandin O.A., Verkhoturov A.R. Dinamicheskaya model' vzaimodeistviya ploskopolyarizovannykh elektromagnitnykh voln s chastitsej dielektrika [Dynamic model of interaction of plane polarized electromagnetic waves with dielectric particles]. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh processov. XV mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya — Kulagin readings: technique and technology of production processes. XVIII international scientific and practical conference, 2018, vol. 2, pp. 158–160.*
- [17] Yagodnikov D.A. *Gorenie poroshkoobraznykh metallov v gazodispersnykh sredakh* [Combustion of powdered metals in gas-dispersed media]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, BMSTU Publ., 2018.
- [18] Landau L.D., Lifshic E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media], Moscow, Fizmatlit Publ., 1992.

Shostov A.K., engineer, Scientific and Educational Complex “Energomashinostroenie” 1.5, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: catcher.boxer@gmail.com

Fedotova K.V. Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Field of scientific interests: working processes in the combustion chambers of rocket and jet engines, numerical simulation and experimental study of the features of flow, heat transfer and combustion in the combustion chambers of rocket and jet engines. e-mail: fedotova@bmstu.ru

Kozichev V.V. Senior Lecturer, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: ko_vv@bmstu.ru